

Die Entwicklung unterschiedlicher Wirbelformen im Tropfbildversuch

Teil 2¹

Strömungsbewegungen im Girlandenringwirbel

So wie ein Ringwirbel sich gliedert, wenn er gegen die Wasseroberfläche läuft (Abb. 2), so gliedert sich beim Tropfbild der Girlandenringwirbel, wenn der Tropfen auf die Wasserprobe geprallt ist (Abb. 1).

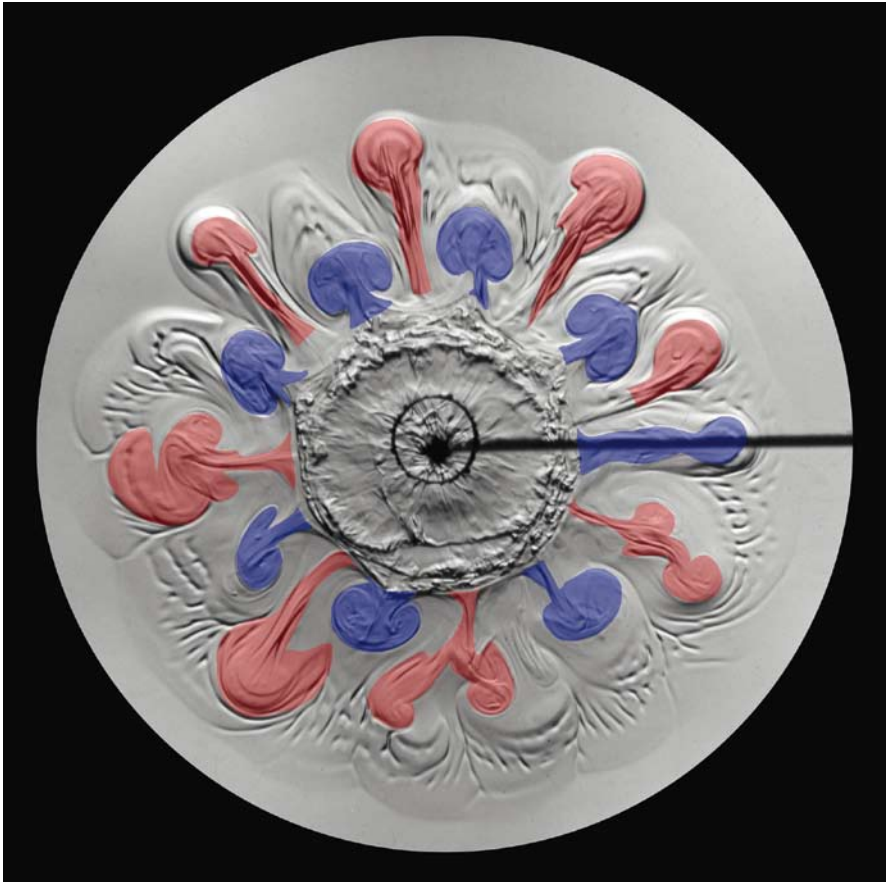


Abb. 1: Tropfbild vom 25. Tropfen, Wirbel auf Foto eingefärbt

¹ Der erste Teil des Beitrags erschien in WASSERZEICHEN Nr. 60 (siehe auch www.stroemungsinstitut.de/shop/freie-downloads-faq „Forschung“)

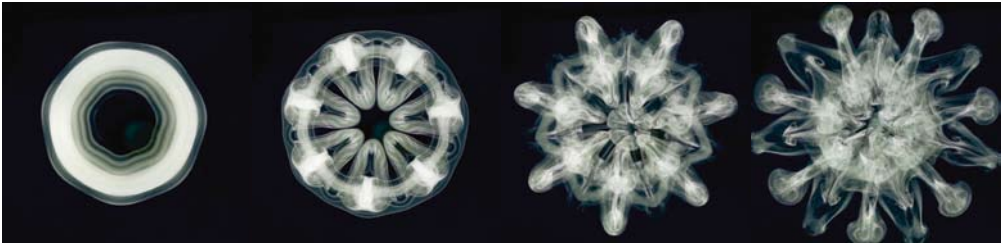


Abb. 2: Ringwirbel-Entwicklung von links nach rechts. Bild ganz rechts auch in Abbildung 3.

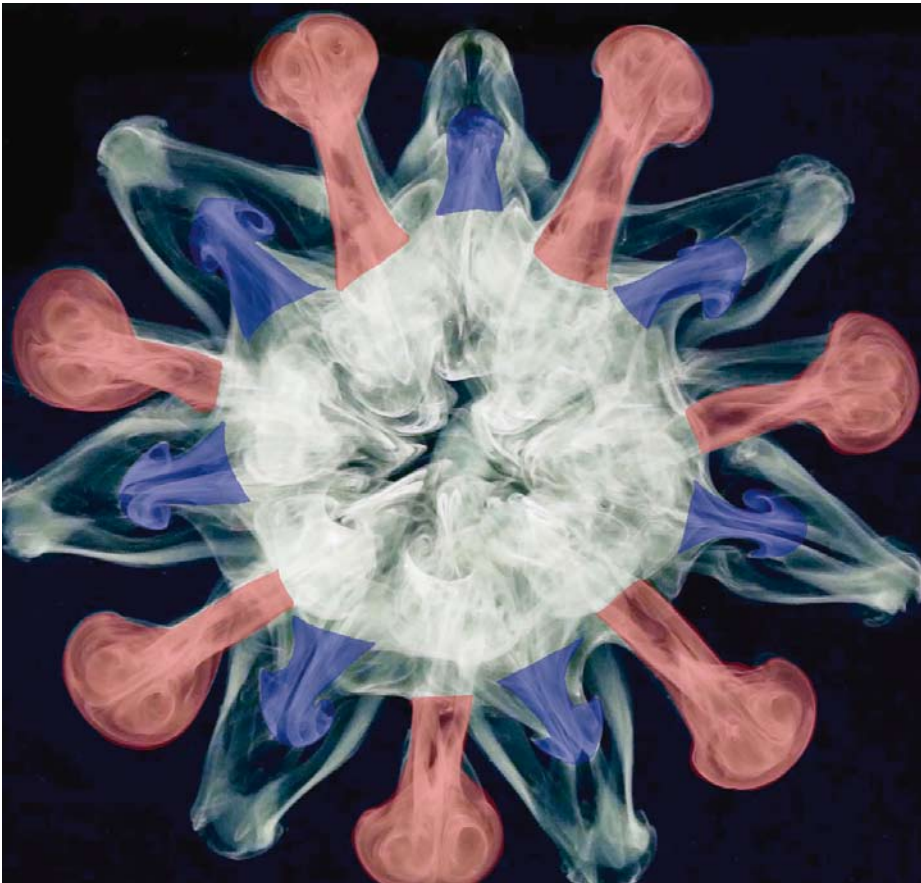


Abb. 3: Ringwirbel, letztes Stadium, mit auf Foto eingefärbten Wirbeln

Wirbelarten

Wirbel mit gerader Wirbelachse haben einen weiten Bereich, wo die Strömung außen langsamer und innen schneller rotiert, und einen inneren Bereich, wo die Strömung sich ähnlich einem festen Körper verhält.

Das geschieht auch in einem Ringwirbel, wobei die Wirbelachse zu einem Kreis geschlossen ist (Abb. 5).

Man kann sich den Ringwirbel wie einen zu einem Kreis geschlossenen Schlauch vorstellen, in dem das Wasser um die ringförmige Wirbelachse kreist, und es können auch Strömungen in Achsrichtung entstehen. Ein solcher Ringwirbel ist ein strömungsphysikalisch instabiles Gebilde. Das führt dazu, dass er in zwei Richtungen wellig wird: von oben gesehen nach innen und nach außen und von der Seite gesehen nach unten und nach oben (Abb. 6).

Das Welligwerden ist ein Prozess, der sich selbst verstärkt. Beginnt es an einer Stelle, breitet er sich aus und die Ausbuchtungen werden größer.

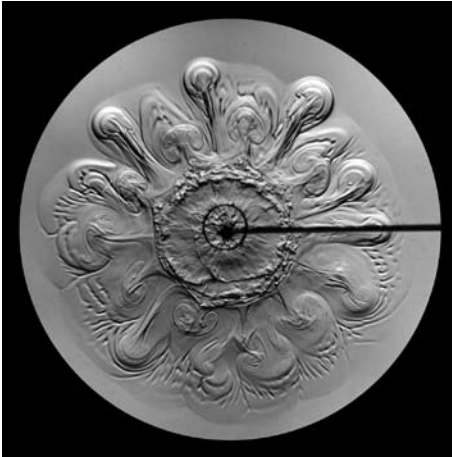


Abb. 4: Tropfbild von Abb. 1 ohne Einfärbung

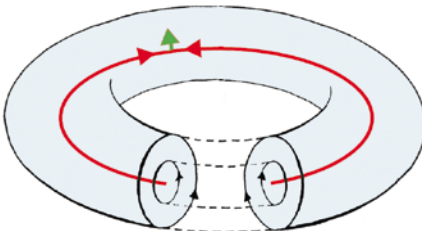


Abb. 5: Ringwirbel schematisch. Wirbelachse rot, rote Pfeile zeigen die axiale Strömung

Das Welligwerden führt zu axialen Strömungen im ringförmigen Wirbelschlauch, siehe rote Pfeile in Abbildung 5. Wo der Durchmesser des Ringes durch eine Ausbuchtung größer ist, strömt die Flüssigkeit in axialer Richtung von beiden Seiten dorthin, sodass der Ringwirbel dort dicker wird, siehe Abbildung 5 grüner Pfeil.

Beim Tropfbildversuch geraten die nach unten gehenden Ausbuchtungen früher in den Einflußbereich des Bodens, wo sie etwas zurück bleiben, während der Girlandenringwirbel außen noch etwas zunimmt (Pfeile Abb. 7).

Das Welligwerden in zwei Richtungen hat zur Folge, dass sich zwei unterschiedliche Tropfbildwirbelarten bilden, die sich abwechselnd aus dem Girlandenringwirbel entwickeln.

Siehe Abbildungen 1, 4, 7 und 8.

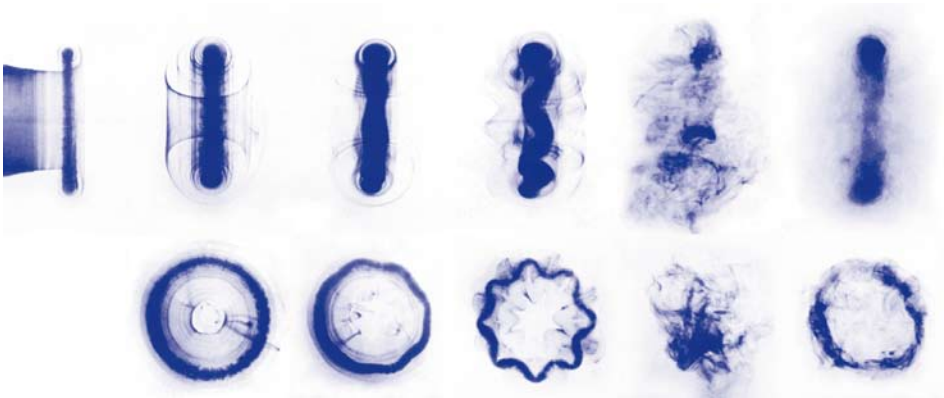


Abb. 6: Wellig werden, Auflösen und neu Formieren eines Ringwirbels. Oben: seitlich und unten entgegen Laufrichtung gesehen. Bilder vom gleichen Wirbel

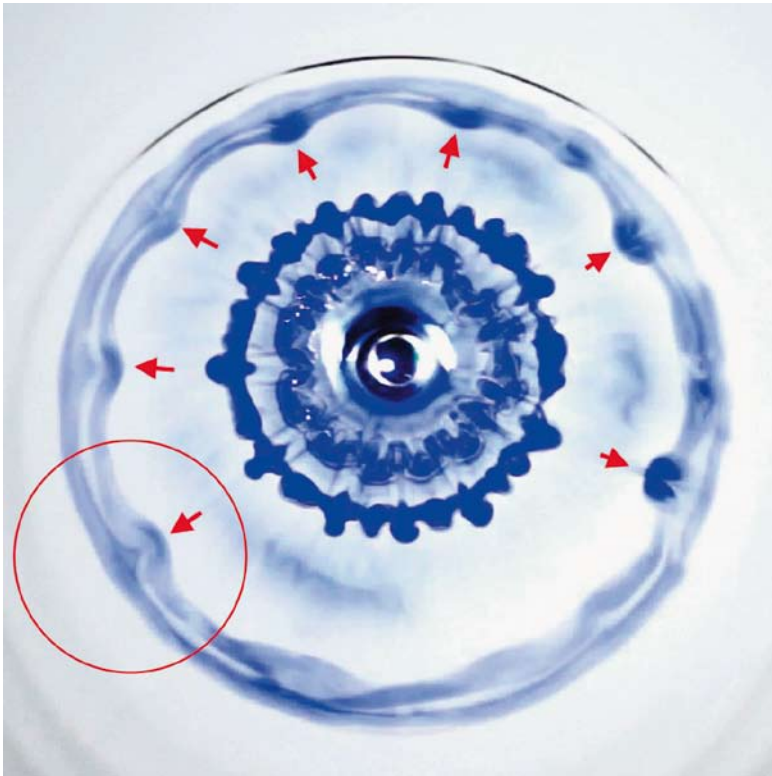
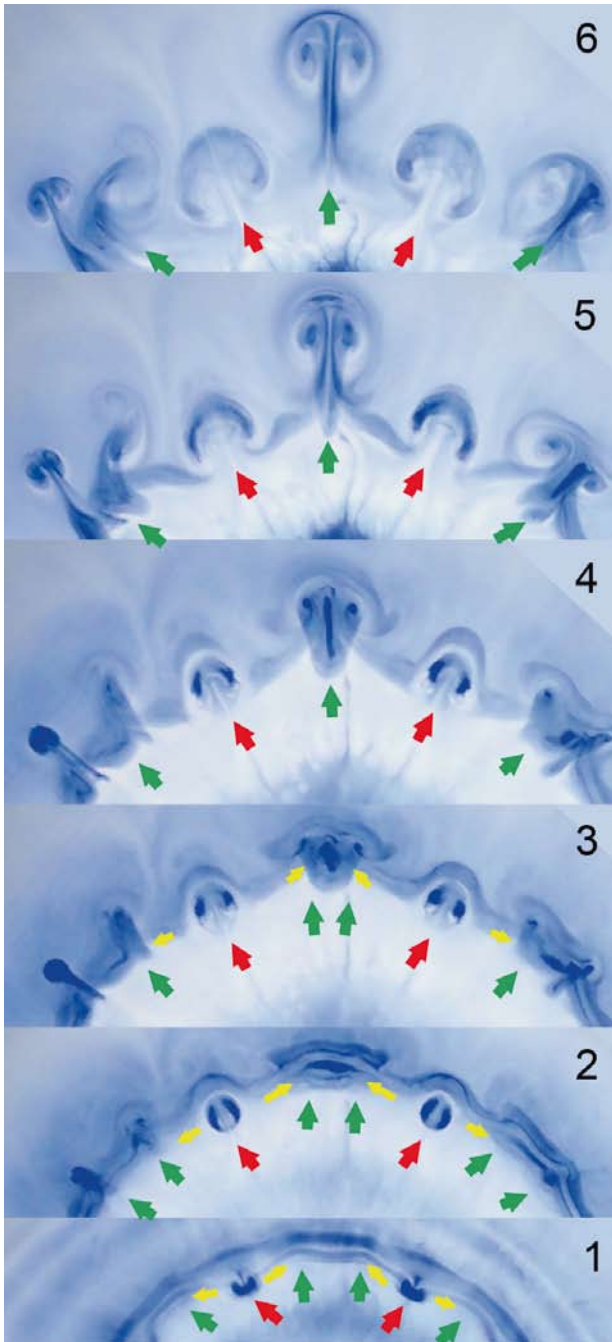


Abb. 7: Girlandringwirbel. Pfeile markieren zurückbleibende Ausbuchtungen nach unten



Die Tropfbildwirbel

Abbildung 8 zeigt an einem Ausschnitt die Entwicklung der Tropfbildwirbel und die abwechselnde Anordnung der Wirbelformen: die sogenannten Primärwirbel sind mit grünen Pfeilen markiert und die Zwischenwirbel sind mit roten Pfeilen markiert.

Die Zwischenwirbel entstehen aus den Ausbuchtungen des Girlandenringwirbels in Bodennähe, Abbildung 7. Sie bleiben gebremst vom Boden etwas zurück und schnüren sich vom Girlandenringwirbel ab, Abbildung 9 und 10. Dadurch wird der Halt im Wirbelring unterbrochen und axiale Strömungen, gelb markiert, gehen von beiden Seiten von den Zwischenwirbeln aus in Richtung Ursprung der Primärwirbel (grün). Dadurch entsteht zunächst eine längliche Verdickung im Girlandenringwirbel (Abbildung 8, Bild 1 Mitte), die dann kürzer und dicker wird. Die Bewegungsenergie der axialen Strömungen (gelb), die

Abb. 8: Die Bildsequenz aus einem Video zeigt die Entwicklung der Tropfbildwirbel an einem Ausschnitt aus einem Tropfbild. Die Pfeile markieren die Wirbel: Zwischenwirbel rot, Primärwirbel grün.

von beiden Seiten aufeinander prallen, schleudert einen Tropfbildwirbel nach außen (Abbildung 8, Bild 4 – 6, grüne Pfeile). In diesem Beispiel ist der Primärwirbel (Bild 6 Mitte) aus zwei Wirbelansätzen fusioniert (Bild 1 grüne Pfeile).

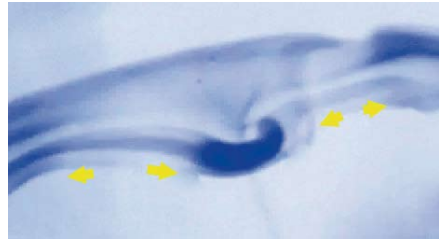


Abb. 9: Abschnürung des Zwischenwirbels vom Girlandenringwirbel. Axiale Strömung gelb markiert. Siehe Kreis in Abbildung 7

Der Antrieb für das Wandern des Ringwirbels nach außen hat noch eine weitere Komponente, es ist die Bewegung des Ringwirbels selbst, die ihn durch das Medium wandern lässt. Wie in Ringwirbeln in der Luft und in tiefem Wasser, beeinflussen sich die Drehbewegungen der jeweils einander gegenüber liegenden Wirbelteile so, dass der Ringwirbel von sich aus durch das Medium wandert.

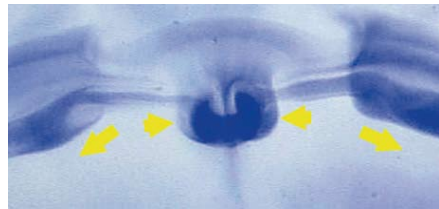


Abb. 10: Der Zwischenwirbel hat sich abgeschnürt, der Halbbogen von Abb. 9 schließt sich zu einem U und bis zu einem Kreis.

Strömungen beim Entstehen eines Zwischenwirbels

Abbildung 11 zeigt einen kleinen Ausschnitt (gelb) von einer Ausbuchtung des Girlandenringwirbels (grün). Er verläuft im Bild von links oben bis nach rechts unten. In der Mitte ist er nach unten ausgebuchtet. Der dicke große, rote Pfeil, rechts im Bild, zeigt die Ausbreitungsrichtung des Girlandenringwirbels. Die dunkelblauen Kreise markieren die kreisende Bewegung der Flüssigkeit im Girlandenringwirbel.

Die von Tinte blau gefärbten Teile sind Reste vom zweiten Ringwirbel, der mit dem Girlandenringwirbel entstanden ist.

Die pinkfarbigen Pfeile im Girlandenringwirbel zeigen die axialen Strömungen, die von beiden Seiten auf die Ausbuchtung (grün) gerichtet sind. Dadurch schwillt diese an. Die grünen Pfeile sollen das Zurückbleiben der Ausbuchtung zeigen. Das Stadium entspricht dem auf Abbildung 9.

Aufnahmetechnik

Fast alle hier gezeigten Aufnahmen von Strömungsvorgängen sind Einzelbilder aus Videoaufnahmen, die mit Bildraten von 50 Bildern pro Sekunde und kurzen Belichtungszeiten aufgenommen wurden. Die Bilder der Abbildungen 8, 9, 10, 14

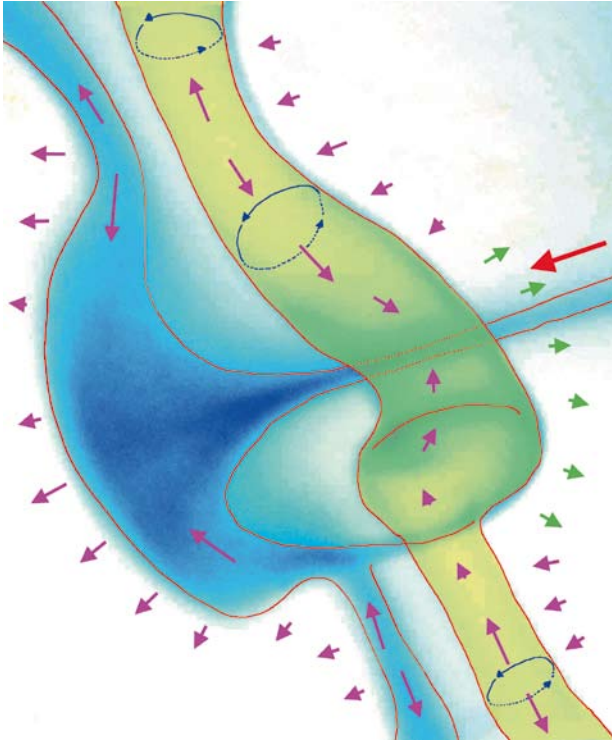


Abb. 11: Strömungen beim Beginn des Abschnürens eines Zwischenwirbels. Aus Stereoaufnahmen geht hervor, dass die Ausbuchtung des Girlandenringwirbels (gelb-grün gefärbt) nach unten in Richtung Schalenboden weist. Bild von schräg oben aufgenommen. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 13

und 15 wurden mit 1000 Bildern pro Sekunde und Belichtungszeiten von 1/12800s gefilmt.

Die anderen Bildelemente im Tropfbild: Kernzone und Dendritenzone werden in diesem Beitrag nicht behandelt.

Tropfbildwirbelformen

Die sich abwechselnden Wirbelarten, die den Girlandenringwirbel gliedern, sind in den Abbildungen 14 und 15 anhand von jeweils 6 Beispielen zusammengestellt. Für jede Wirbelform sind, von links nach rechts, Bilder von drei Stadien wiedergegeben: bei den Primärwirbeln: 1. das Dickwerden des Wirbelschlauches, 2. ein Zwischenstadium und 3. der fertige Wirbel. Bei den Zwischenwirbeln hat man 1. die Abschnürung aus dem Girlandenringwirbel, 2. ein Zwischenstadium und 3. den fertigen Wirbel. Es folgt eine Skizze vom Umriß des jeweiligen Wirbels, und jeweils ein Ausschnitt aus einem Standard-Tropfbild, aufgenommen in einer Schlierenapparatur.

Abb. 12:

Der Versuchsaufbau für die Fotografie von unten mit einer Opal-glasscheibe als Hintergrund dicht über der Probenflüssigkeit. Die Fotos von den Abbildungen 7 bis 10 und 13 - 15 wurden mit diesem Aufbau aufgenommen.

Besonderheiten der Tropfbildwirbel

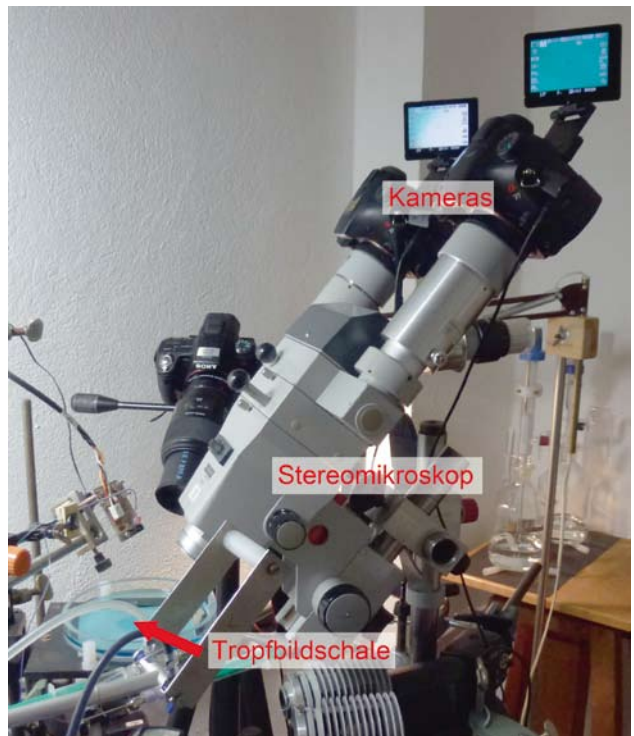
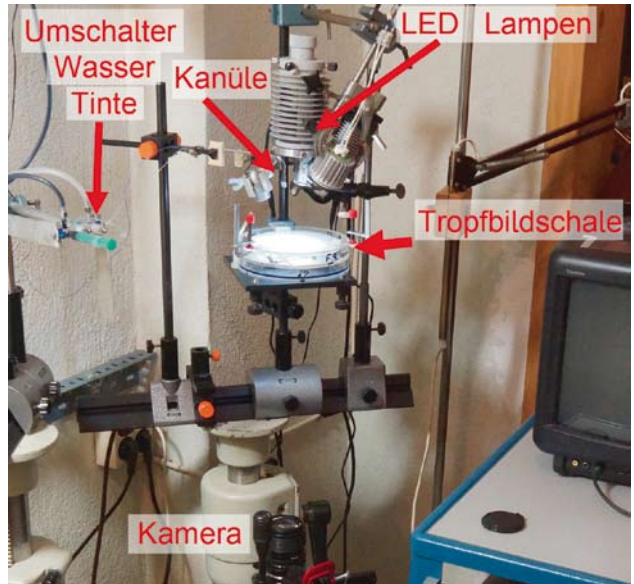
Schon bei der Entstehung der Primärwirbel, im Folgenden *P-Wirbel* genannt, und der Zwischenwirbel, im Folgenden *Z-Wirbel* genannt, unterscheiden sich die beiden Arten ganz deutlich voneinander.

Die *P-Wirbel* entstehen aus einer Verdickung des Girlandenringwirbels, im Folgenden *G-Ringwirbel* genannt, die durch axiale Strömungen entsteht. Diese Wirbel bleiben mit dem *G-Ringwirbel* verbunden, was sich in ihrem dicken Stiel zeigt (Abb. 14, Wirbel 3 und Abb. 19).

Die *Z-Wirbel* entwickeln sich viel früher als die *P-Wirbel* und schnüren sich ganz vom *G-Ringwirbel* ab (Abb. 15, Wirbel 12).

Abb. 13:

Der Versuchsaufbau für die Stereoaufnahme in Abbildung 11, von schräg oben aufgenommen. Unter der Tropfbildschale befand sich eine Opalglasscheibe für einen weißen Hintergrund, der von unten beleuchtet wurde.



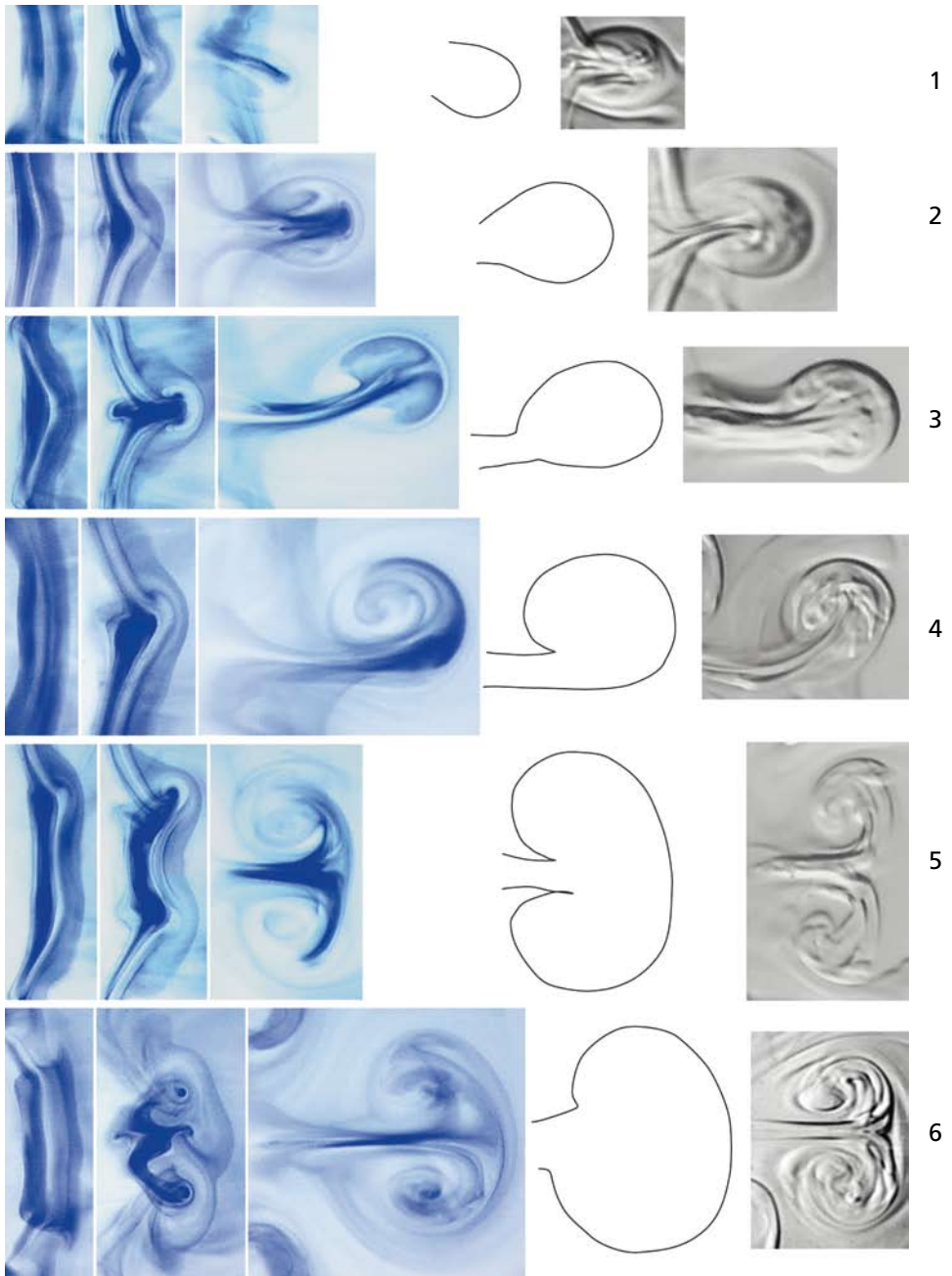


Abb.14: Erscheinungsformen der *Primärwirbel*

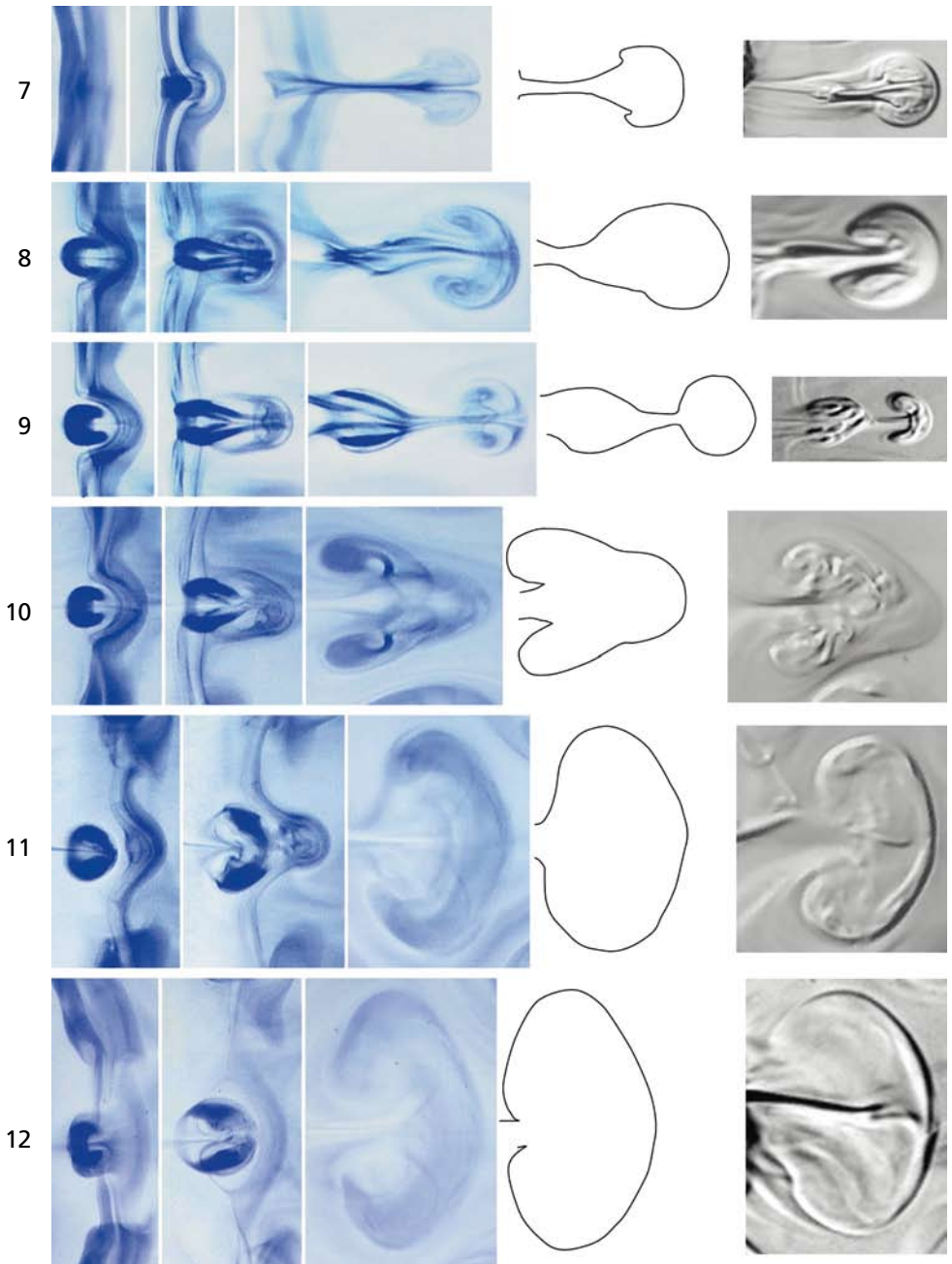


Abb.15: Erscheinungsformen der *Zwischenwirbel*

Das hat zur Folge, dass die jetzt freien Enden des G-Ringwirbels in Richtung P-Wirbel zusammenschnurren und deren Entwicklung dadurch fördern. Die beiden freien Enden am abgeschnürten Z-Wirbelstück schließen sich fast zu einem Ring zusammen, aus dem die Z-Wirbel entstehen (Abb. 20).

Die P-Wirbel haben die Besonderheit, dass oft aus zwei nahe nebeneinander liegenden Verdickungen des G-Ringwirbels anfangs zwei Wirbel entstehen, die dann zu einem verschmelzen (Abb. 14, Wirbel 5 und 6).

Bei den Z-Wirbeln besteht die Besonderheit, dass an einer Stelle im G-Ringwirbel zwei Wirbel entstehen, aber nicht nebeneinander, sondern hintereinander (Abb. 15, Wirbel 9 und 11).

Die Abbildungen 14 und 15 zeigen zwölf häufig vorkommende Tropfbildwirbel. Es gibt aber noch viel mehr und vor allem alle möglichen Übergänge. Auch der Wechsel von P- mit Z-Wirbeln ist nicht immer zu erkennen und sie sind oft nur an einer Seite im Tropfbild vorhanden.

Bezeichnungen

In Tabelle 1 sind kurze charakterisierende Bezeichnungen für die Tropfbildwirbel aufgelistet:

| Primärwirbel | Zwischenwirbel |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1 Wirbel bleibt in Girlande | 7 klein, dünn gestielt |
| 2 Wirbel auf Girlande | 8 größer, gestielt |
| 3 Wirbel langgestielt | 9 gestielt mit dicker Basis |
| 4 einseitig neben Z-Wirbeln | 10 breit mit Ansatz von zwei Wirbeln hintereinander |
| 5 zwei Wirbel fusionieren zu einem, zwischen zwei Z-Ringwirbeln | 11 Z-Wirbel mit zweitem Wirbel |
| 6 wie 5. aber langgestielt | 12 klassischer Z-Wirbel |

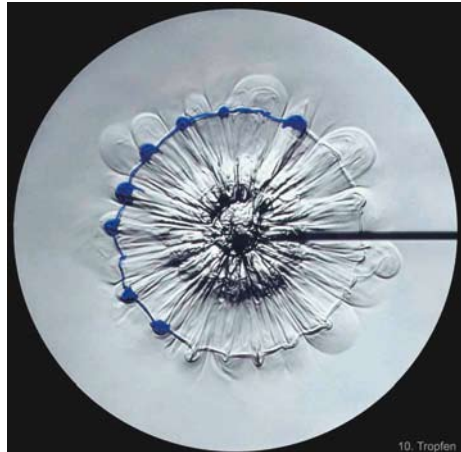
Tabelle 1: Bezeichnungen

Es folgen ein paar Tropfbildbeispiele mit auf dem Foto zum Teil angefärbten Tropfbildwirbeln.

Abb. 16:

Tropfbild vom 10. Tropfen. Unten rechts sind fast keine Wirbel zu sehen, nur die Girlande ist da. Auf der linken Seite sind viele Wirbelansätze (blau gefärbt), die noch in der Girlande stecken.

Solche Bilder kommen häufiger bei beeinträchtigten Wasserproben vor, selten, in geringer Zahl können sie auch bei gutem Wasser vorkommen. P- und Z-Wirbel kann man hier nicht unterscheiden.

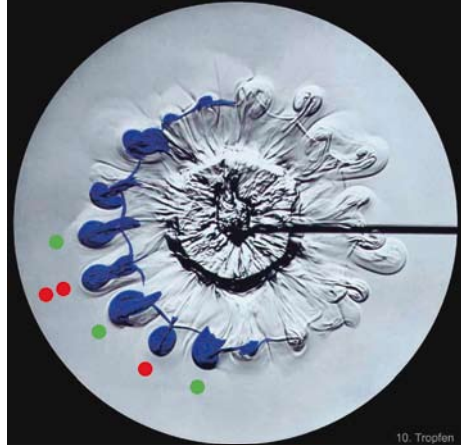


10. Tropfen

Abb. 17:

Tropfbild vom 10. Tropfen. Der rote Punkt bei der Position 7 Uhr markiert einen typischen Z-Wirbel mit ganz dünnem Stiel. Der rote Doppelpunkt markiert einen Z-Wirbel mit zwei Köpfen. Die Wirbel sind überwiegend gar nicht oder nur kurz gestielt.

Das Bild hat eine unterdurchschnittliche Wirbelentfaltung und kommt eher bei leicht beeinträchtigten Wasserproben vor.



10. Tropfen

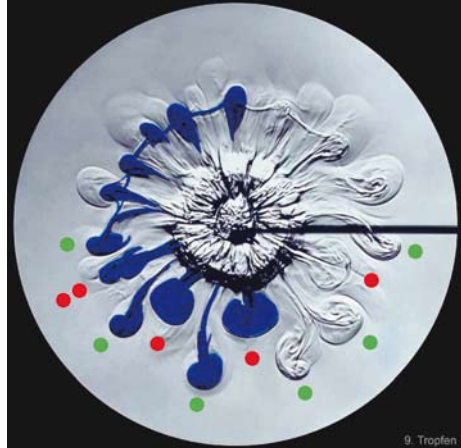
grüne Punkte P-Wirbel

rote Punkte Z-Wirbel

Abb. 18:

Tropfbild vom 9. Tropfen.

Dieses Bild gilt als vielgestaltig, fast alle Wirbelformen kommen vor und ihre Anordnung ist nicht streng. Oben stecken die Wirbel noch in der Girlande, unten wechseln P- und Z-Wirbel ab. Ein bei guten Wasserproben häufiges Bild.



9. Tropfen

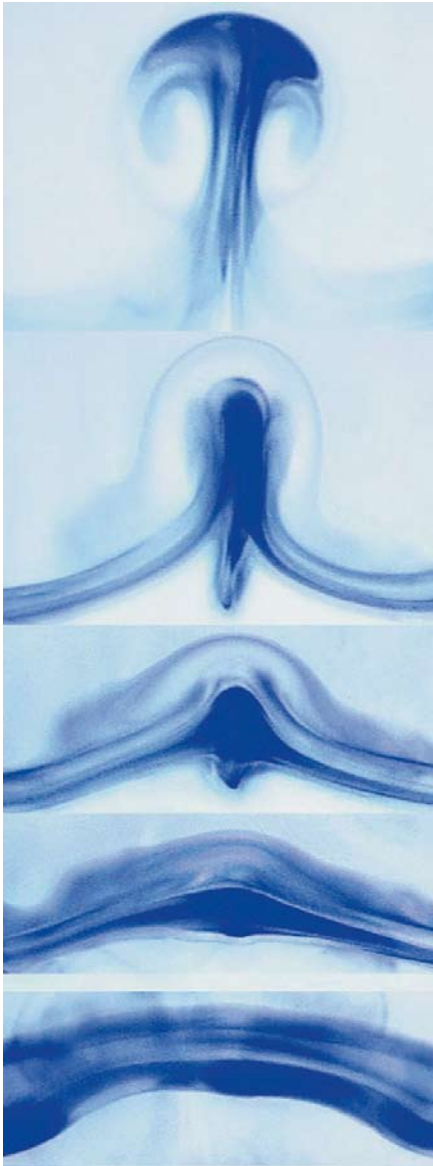


Abb. 19:
Entwicklung eines
Primärwirbels
aus einer Verdickung des G-Ringwirbels,
von unten nach oben

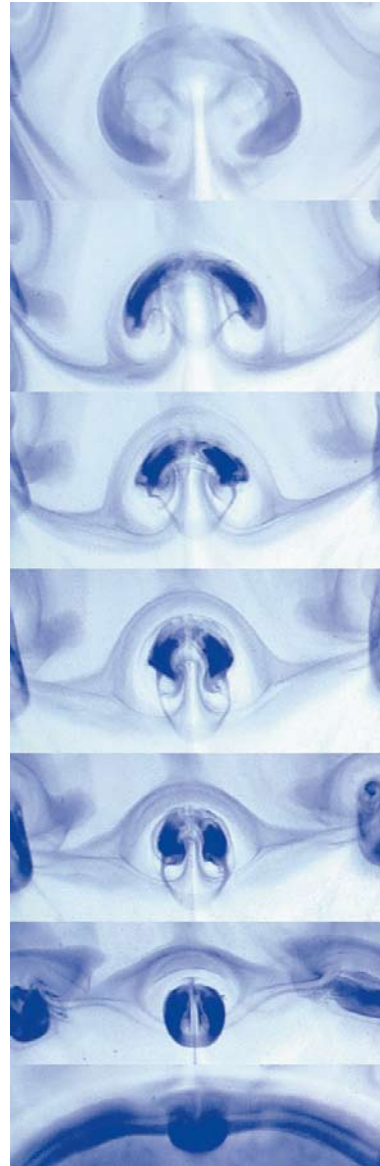


Abb. 20:
Entwicklung eines
Zwischenwirbels
durch Abschnüren aus einem Teil
des G-Ringwirbels

Die bis hier gezeigten Gruppen von Wirbeln findet man in stark abgeschwächter und veränderter Form bei sogenannten *Einfachblättrigen* Tropfbildern wieder.

Diese Wirbel sind sehr einfach, ohne Struktur und ohne Kopf und Stiel. Angedeutet können verwaschene P- und Z-Wirbel vorkommen.

Solche Tropfbilder entstehen bei Wasserproben mit Verunreinigungen von organischen Substanzen, die sich auf der Wasseroberfläche ansammeln.

Andreas Wilkens

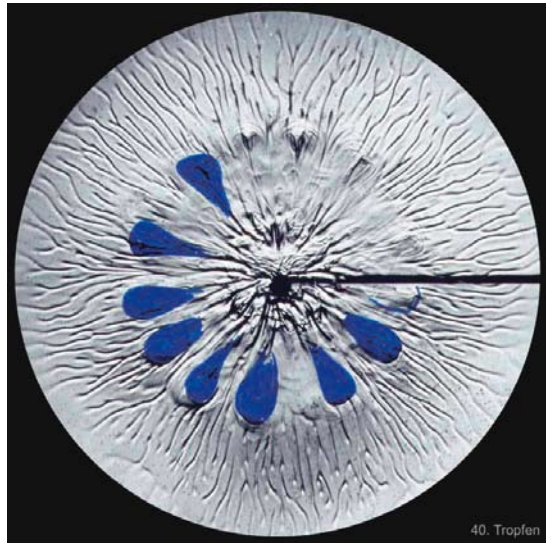


Abb. 21: Einfachblättriges Tropfbild vom 40. Tropfen. In Schlierenoptik aufgenommen

Bilder:

Abb. 6: Christian Liess

Alle anderen Bilder Andreas Wilkens

Literatur:

WasserZeichen 60/2023: „Die Entwicklung unterschiedlicher Wirbelnformen im Tropfbildversuch Teil 1“

Liess, Christian (1/1978): „Experimentelle Untersuchung des Lebenslaufes von Ringwirbeln“, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen